干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

南疆西部春季一次极端暴雪天气综合分析

施俊杰[1]， 孙鸣婧[1]， 吕新生[1]， 张俊兰[1]， 李火青[2]

（1. 新疆维吾尔自治区气象台，新疆 乌鲁木齐 830002；
2. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所，新疆 乌鲁木齐 830002）

摘　要：利用FY2E卫星资料，多普勒天气雷达产品，常规高空及地面观测数据和美国气象环境预报中心（NCEP，0.25°×0.25°）再分析资料，对2017年3月3—6日南疆西部一场极端暴雪过程进行综合分析。结果表明：500 hPa中亚低涡是此次极端暴雪天气的影响系统。暴雪的水汽主要有3支输送路径，分别是中高层的偏西、偏南和中低层的偏东路径。本次降雪具有冷季高架对流的部分特征：南疆盆地850~700 hPa冷空气东灌形成的偏东急流将南疆西部相对暖湿的空气抬升到一定高度，起到"冷垫"的作用；在卫星云图上，降雪云带内有黑体亮温（TBB）<−65 ℃、尺度介于80~200 km之间的中-β尺度对流云团；雷达回波表现为层状回波中夹杂有块状回波，最大反射率>40 dBZ，回波顶高>6 km；进一步分析地转绝对动量（Mg）和假相当位温（θse）发现，条件性对称不稳定导致的倾斜对流导致强降雪发生。

关 键 词：暴雪；低空急流；不稳定机制；倾斜对流；南疆西部
文章编号：

新疆是我国三大雪灾区之一，新疆暴雪多发在北疆，南疆盆地降雪明显少于北疆，在其干旱的气候背景下，平原区年降水量仅在40~70 mm之间[1]。南疆西部地处中国最西端，其东部为帕米尔高原，北部为天山，南部为昆仑山，下垫面复杂，生态环境脆弱，对气候变化较为敏感，降雪天气系统受地形影响非常显著。春季正值南疆牲畜转场、春耕春播的关键时期，强降雪天气常给当地的畜牧业及设施农业、社会运行及交通运输带来严重危害。

国内外诸多学者对暴雪的产生机制进行了大量研究，也取得了很多成果[2-9]。对于新疆境内的暴雪，研究多集中在北疆暖区暴雪和天山北坡冷锋暴雪，北疆降雪落区与中尺度天气系统、黑体亮温的关系已在多个研究中提到，且暴雪过程中水汽条件、高低空急流等动力耦合机制及温度平流等特征也都有归纳总结[10-17]，但南疆暴雪与北疆暴雪的机制和成因存在显著差异。研究指出，无论是影响系统、水汽条件，还是偏东低空急流的作用，南疆暴雪与夏季暴雨机理相似[18]，这是否说明南疆暴雪具有夏季暴雨的对流性质呢？张云惠等[19]发现2005年2月南疆西部暴雪是塔什干低涡与地面倒流冷空气共同作用造成的，冷暖空气在地面2~3 km的高空之上交汇，上暖下冷，锋面脱离地面。这种配置在新疆的降雪研究中少见，是否属于冷季高架对流呢，是否与南疆西部的特殊地形有关呢，这些问题都值得进一步探究。

Colman早在1990年就提出了冷季高架对流的概念，它是指发生在低层冷空气之上的暖湿空气对流[20]。国内对冷季高架对流的研究大多在2000年以后，吴乃庚等[21]分析两广地区的高架雷暴后发现，在弱的条件不稳定下，850 hPa切变线是触发机制。张一平等[22]的研究认为，2012年河南早春的高架雷暴在700 hPa以上出现强上升运动，是在近中性条件性不稳定层结（偏向很弱的条件不稳定）下，高空槽前正涡度平流和低层暖湿平流强迫导致的。俞小鼎等[23]总结了冷季高架对流形成的3种机

收稿日期：2021-03-02；　**修订日期**：2021-05-24
基金项目：国家自然科学基金重点项目（42030612）；第二次青藏高原综合科学考察研究项目（2019QZKK0102）资助
作者简介：施俊杰（1993-），男，助理工程师，主要从事新疆天气预报技术研究. E-mail: belongtab@163.com
通讯作者：吕新生（1965-），男，高级工程师，主要从事新疆天气预报分析及技术研究. E-mail: 372518189@qq.com

制：条件不稳定导致的垂直对流、条件对称不稳定导致的倾斜对流和中性条件下锋生强迫的较强垂直环流。本文针对2017年3月3—6日帕米尔高原东部的一次累积降雪量大（最大中心41.5 mm）、持续时间长（43 h左右）、灾害性强的极端暴雪过程，利用多源资料，分析此次暴雪天气成因，重点探明短时间内产生强降雪的对流机制，提升对南疆山区暴雪形成机制及中尺度系统特征的认知，为今后南疆暴雪分析及预报提供科学参考。

1 资料与方法

选取克孜勒苏柯尔克孜自治州（简称克州）和喀什地区的常规探空及地面观测资料、美国气象环境预报中心（NCEP，0.25°×0.25°）再分析资料，用天气动力学方法分析2017年3月3—6日南疆西部大暴雪天气的环流形势、高低空配置和动力特征；采用FY2E和喀什站C波段雷达资料分析中尺度系统演变特征，FY2E红外云图数据通过等值线处理得到云顶黑体亮温（TBB），雷达数据用美国GR2Analyst软件处理。降雪量级使用新疆本地标准，24 h降雪量6.1~12.0 mm为大雪、12.1~24.0 mm为暴雪、≥24.1 mm为大暴雪，日降雪时间选20:00—次日20:00。

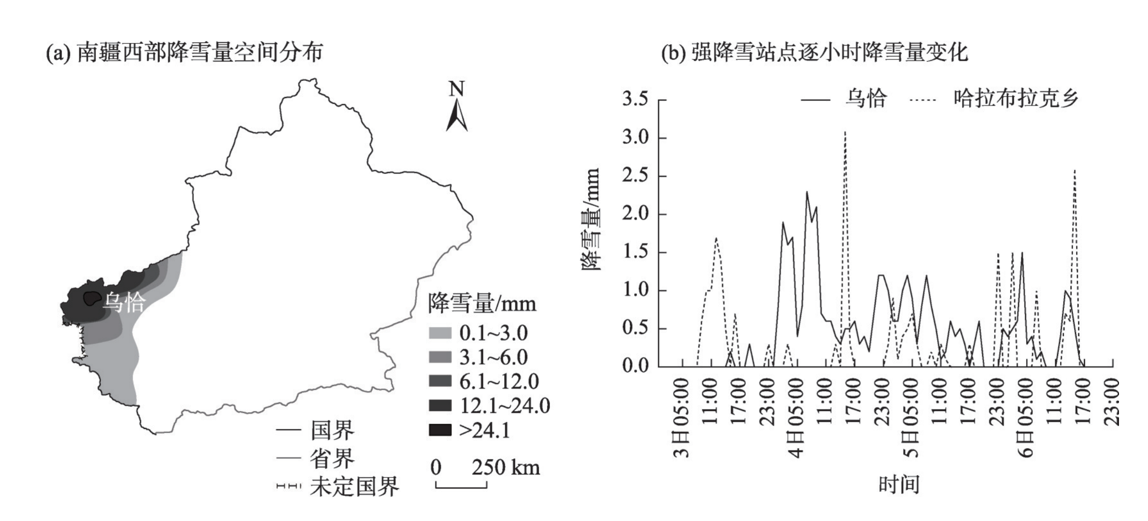
取地面至700 hPa表示地面低层，700~500 hPa表示中层，由于实际大气中300 hPa以上水汽含量非常少，故取500~300 hPa表示高层，进而计算暴雪区域内水汽输入、输出和收支量，分析不同层次水汽输送特征及暴雪过程的水汽收支情况，其中沿80°E的35°~43°N范围为东边界，73°E的35°~43°N范围为西边界，沿35°N的73°~80°E范围为南边界，43°N的73°~80°E范围为北边界。

2 结果与分析

2.1 暴雪实况及极端性分析

2017年3月3日凌晨至6日白天，南疆西部的克州和喀什地区自西向东出现强降雪（图1a），5站累积降雪超过12.0 mm。乌恰站和阿合奇县哈拉布拉克乡站降雪量突破历史极值；乌恰站降雪量达41.5 mm，接近其年平均降水量的1/4，其过程降雪量为近20 a最大，最大日降雪量18.6 mm为历史同期第一；阿合奇县哈拉布拉克乡站降雪量23.2 mm，其过程累积降雪量和日降雪量均为建站以来最大值；此外阿克陶县喀热克其克乡、阿合奇和吐尔尕特站出现暴雪，降雪量分别为16.4 mm、15.6 mm和14.8 mm。

从日降雪来看乌恰站3月4日和5日两天持续暴雪（日降雪量分别为18.6 mm和15.0 mm），4日新增最大积雪深度28.0 cm，6日增至37.5 cm，同时吐尔尕特站积雪深度达33.0 cm，均为历史同期最大，严重影响了当地农牧业及交通运行。此次暴雪小时降雪强度大，4日凌晨至白天为最强降雪时段，乌恰站4日07:00和09:00小时降雪强度分别为2.3 mm·h^{-1}、2.1 mm·h^{-1}，阿合奇县哈拉布拉克站4日和6日15:00小时降雪强度分别达3.1 mm·h^{-1}和2.6 mm·h^{-1}（图1b）。



注：图1a基于新疆第二地理测绘院审核的审图号为新S(2019)204号的标准地图制作，底图无修改。

图1 降雪实况

Fig. 1 Actual snowfall

2.2 大尺度环流背景

此次降雪天气的影响系统为中亚低涡，3日08:00，500 hPa上塔什干地区生成一闭合涡旋，中心强度为548 dagpm，且有-32 ℃的冷中心与之配合（图2a），3日20:00，受欧洲不稳定小槽影响，里咸海脊略有东南衰退，低涡继续加深，其前部的西南气流覆盖了帕米尔高原、克州、喀什地区、和田地区西部（图2b），西南气流的维持有利于正涡度平流的生成，利于垂直运动发展。

降雪开始前，地面蒙古高压中心强度为1037.5 hPa，南北疆之间气压梯度达17.5 hPa。3日20:00，高压缓慢东移，蒙古高压中心强度加强至1047.5 hPa，南北疆气压梯度进一步加大到27.5 hPa，气压场呈北高南低，东高西低，形成东灌，南疆盆地700~850 hPa偏东风逐步加强。同时蒙古地区存在-16 ℃的冷中心，东西温差达12 ℃，形成了南疆盆地暖、东疆地区冷的温度场配置。4日08:00，850 hPa若羌至阿克苏一线东风加强，若羌出现14 $m\cdot s^{-1}$的低空东风急流（图2c），4日20:00喀什西风转东风，且风速（14 $m\cdot s^{-1}$）也达到急流标准，随着低层东风急流的加强，冷空气由东疆灌入南疆盆地，若羌、民丰站的垂直温度从850 hPa至近地层逐步降温，最低温达-5 ℃。暴雪期间850 hPa喀什至阿克苏、和田之间维持了一条西北—东南向的切变线，冷暖空气长时间在切变线内交汇，暴雪落区位于850 hPa切变线附近；700 hPa东风在4日最强，这与最强降雪时段相一致，此次暴雪位于700 hPa东风顶部的风速辐合区内，6日20:00，700 hPa转为西北气流后，降雪过程结束。

综上所述，此次极端暴雪天气是以500 hPa中亚低涡、700~850 hPa低层东风及切变线形成的“西侵+回流东灌”环流形势降雪。中亚低涡位置偏南，南疆西部位于低涡前的西南气流中，相较往年南疆西部的暴雪，此次过程700~850 hPa低层东风维持的时间明显较长，同时850 hPa南疆西部位于西北风和东南风之间的切变辐合区内，有利于水汽在高原东部辐合产生强降雪，水汽通量散度图上（图略）水汽辐合区也基本与之对应。700~850 hPa从盆地东部回流的冷空气垫有利于降雪区上升气流的发展和维持，这为下文将要分析的不稳定机制提供了有利的天气尺度背景。

2.3 水汽特征分析

图3中正值表示水汽净输入，负值表示水汽净输出，由图可知，中高层水汽随偏西气流经西边界、南边界输入，中低层水汽随偏东气流经东边界输入。在整个暴雪过程中，中高层西边界、南边界的水汽净输入量分别为29.73×10^8 t、16.12×10^8 t，中低层东边界的水汽净输入量为19.57×10^8 t，由此可见中高层偏西、偏南路径的水汽输送为此次暴雪提供了主要的水汽来源，偏东路径的水汽输送也不容小觑。开始降雪时西边界、南边界的水汽输送逐步达到峰值，东边界中低层的水汽输送呈逐步加强的趋势，在3日08:00至5日08:00维持较强（图3a），此时对应降雪强度最大的时段（图1b）。5日20:00至6

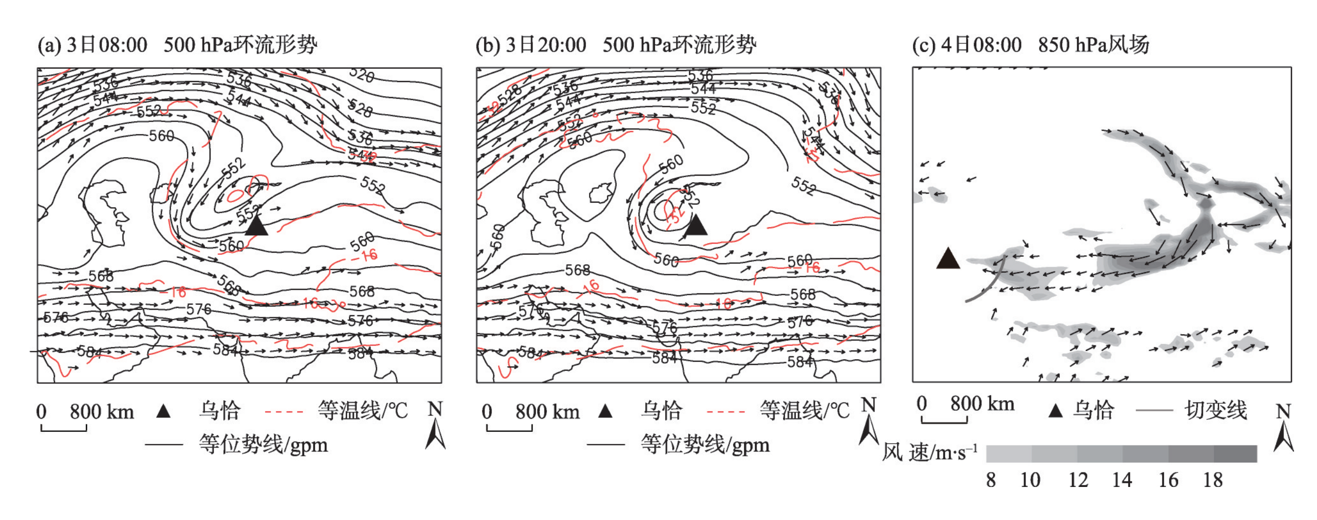
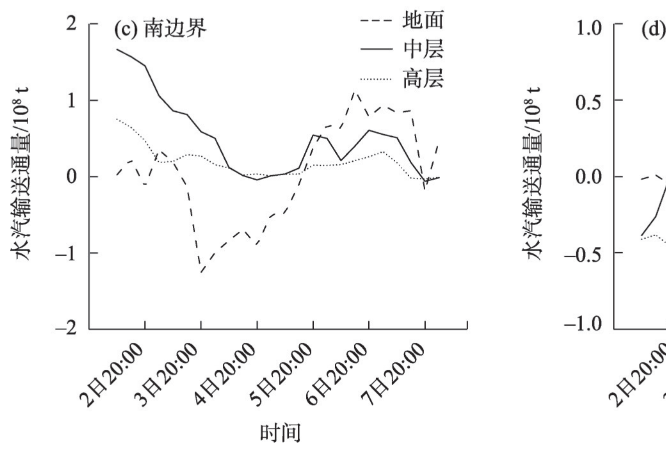


图2 大气环流

Fig. 2 Atmospheric circulation



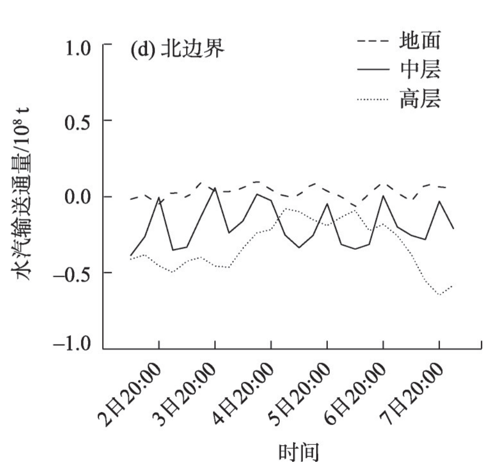


图3　水汽输送量随时间的变化

Fig. 3　Variation of water vapor transport with time

日20:00,东边界、西边界和南边界的水汽输送在减弱后再次加强,这与第2个较强降雪时段相对应。所以中高层偏西、偏南的水汽输送为此次暴雪提供了较为稳定的水汽环境,中低层偏东气流的水汽输送与降雪强度密切相关。

2.4　中尺度特征分析

2.4.1　云图特征　卫星云图可以反映云系发展和演变情况,并可以较好地监测强降雪时段内中尺度云团的发生发展。3日11:30开始,南疆西部国境线以外长约1000 km、宽约300 km、TBB<−35 ℃的狭长云带不断东移北伸,向克州方向伸展,同时位于喀什南部上空长约500 km、宽约700 km、TBB<−30 ℃的降水云带也不断北移(图4a),至3日15:30两条降水云带合并,发展为长约1200 km、宽约1000 km的大范围层状云系,TBB<−35 ℃的范围明显增大,此时喀什和克州境内开始降雪,但降雪强度不大。

随着500 hPa中亚低涡的发展加强,3日22:30,克州、喀什上空大范围云系明显增强,覆盖克州上空的云系TBB<−40 ℃,克州西部和喀什北部有块状云系发展,4日01:30(图4b),云系大部TBB<−45 ℃,其中多个TBB<−55 ℃的块状云团不断发展合并,出现了一个TBB<−60 ℃的强中心,与之对应的4日01:30—09:30降雪强度明显增大,乌恰站07:00和09:00小时降雪强度2.3 $mm\cdot h^{-1}$和2.1 $mm\cdot h^{-1}$。在阿合奇县哈拉布拉克乡站出现本次过程的最大小时降雪强度(4日15:00,3.1 $mm\cdot h^{-1}$),克州中部出现一个水平尺度80 km左右、形态近圆形、TBB<−60 ℃的中-β尺度云团(图4c),云图上反应出此次降雪是具有对流性质的。4日22:30,降水云系整体东移北抬,强度虽有所减弱,但仍有中心TBB<−50 ℃、尺度<100 km不断发展的中-β尺度云团,使得部分站点降雪强度>1.5 $mm\cdot h^{-1}$。

由此可见降水云带的发展、移动与降雪发生的时间和落区有较好的对应关系,最强降雪时段出现在对流云团发展的强盛时段。云系内部多个TBB<−45 ℃,尺度<200 km的中-β尺度对流云团对

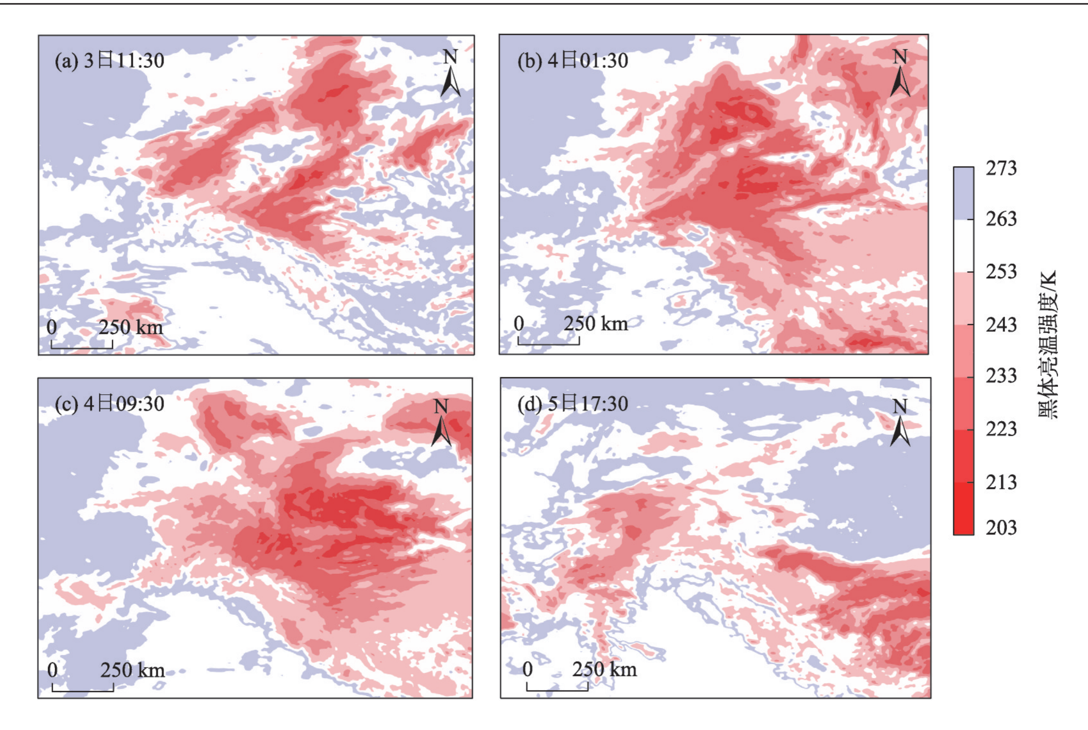


图4　FY2E云顶黑体亮温

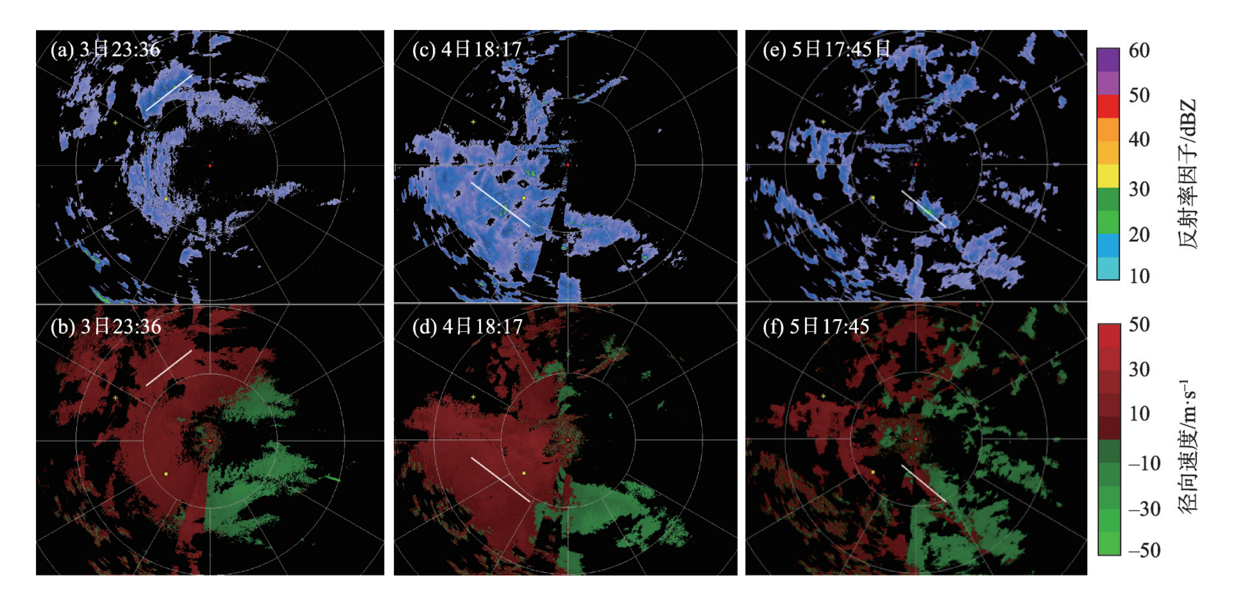
Fig. 4　Black body temperature of FY2E

强降雪的产生起决定性作用。

2.4.2　雷达特征　利用GR2Analyst进一步分析发展、成熟和消散3个阶段的雷达回波演变特征，分别选用3日23:36、4日18:17、5日17:45(北京时，下同)代表不同阶段。

发展阶段(3日00:00—4日00:00)，雷达站西北部和西部各有相对偏强的层状云回波，3日20:00后，西北部层状云回波不断加强，出现若干块状回波，23:36西北部和西部回波南北结合，其中出现了5~7个块状回波(图5a)，径向速度场低层为偏东风且范围扩大(图5b)，3 km高度附近出现超过40 dBZ回波，回波顶高接近8 km(图6a)。

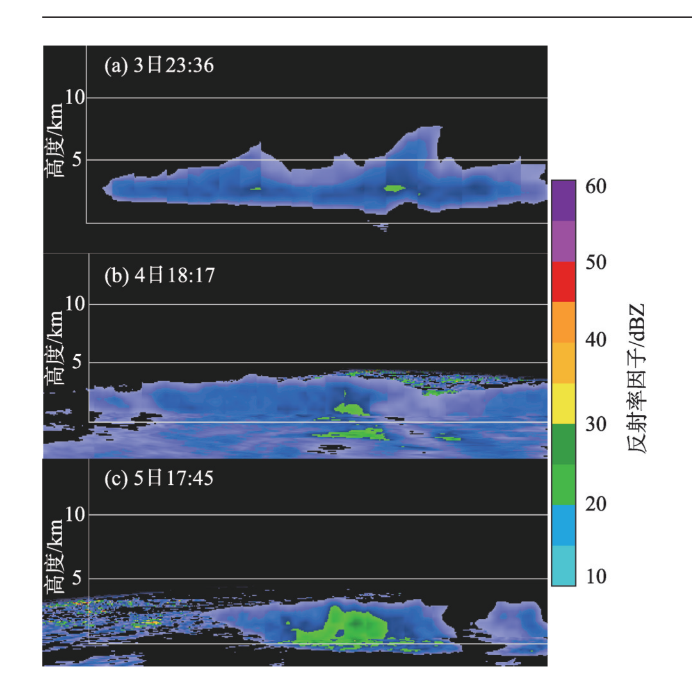
成熟阶段(4日00:00—6日00:00)：随着西南部不断新生的回波并入层状云回波中，乌恰站和阿克



注：仰角为1.5°，白线处为剖面位置。

图5　喀什站多普勒雷达

Fig. 5　Doppler radar at Kashgar station



注:反射率因子沿图5白线的垂直剖面。

图6　喀什多普勒雷达垂直剖面

Fig. 6　Vertical profile of Kashgar Doppler radar

陶县喀热克其克乡站小时降雪强度达到最大。4日18:17,回波内部出现40~45 dBZ强度的块状单体,个别单体回波强度达47 dBZ(图5c),其强度接近夏季对流性回波强度[24],此时回波移动速度缓慢,径向速度场分布范围较大,切向梯度较小,为大面积离站偏东风(图5d);在垂直结构中,40 dBZ回波高度发展至1 km以下,最强回波柱接近地面,及地回波说明降雪出现或持续(图6b)。

消散阶段(6日00:00—14:00),5日08:00后回波强度逐渐减弱,14:00片状回波消失,变为有明显间隙的带状、块状回波,强度较弱,17:45反射率因子基本在15 dBZ以下(图5e和图5f),但个别单体强度较大,对应6日阿合奇县哈拉布拉克站强度较大的小时降雪,3 km以下回波超过40 dBZ,强回波及地(图6c)。5日22:00,若块状回波面积不断缩小,6日11:00趋于消散。

2.5　动力条件及不稳定机制分析

由云图(中-β尺度对流云团)及雷达回波特征(45 dBZ以上的强回波单体)分析可见,此次降雪过程具有明显的对流性质,而在春季出现对流性质降雪的情况远少于夏季,因此有必要重点分析其动力抬升条件及不稳定机制。

2.5.1　动力抬升条件　在研究大气动力过程时需重点关注散度、涡度和垂直上升运动,其中散度为大气在运动过程中的辐合辐散状态,涡度用于描述空气微团旋转运动的强弱程度,上升运动可为暴雪提供原动力。本次过程涡度、散度、垂直速度的剖面如图7所示,降雪开始前,暴雪区(38°~41°N)中上层有较大范围的辐散区,辐合区位于700 hPa以下;2日02:00以后低层辐合逐渐加强,范围扩大;3日20:00低层辐合强度迅速增强,700 hPa以下出现一个强度达$-10\times10^{-5}\ s^{-1}$的辐合中心,与之对应的500 hPa以上存在一个强度为$6\times10^{-5}\ s^{-1}$的辐散中心,此时喀什、克州地区出现降雪,但降雪强度不大;到4日02:00,700 hPa以下的辐合中心继续加强,上层的辐散中心加强至$12\times10^{-5}\ s^{-1}$,为典型低层辐合高层辐散的环流配置,降雪强度也随之增大,对应此次暴雪过程的最强降雪时段。

与散度场类似,降雪区上空500 hPa以下的正涡度区强度和范围也逐步增大,至3日20:00,降雪

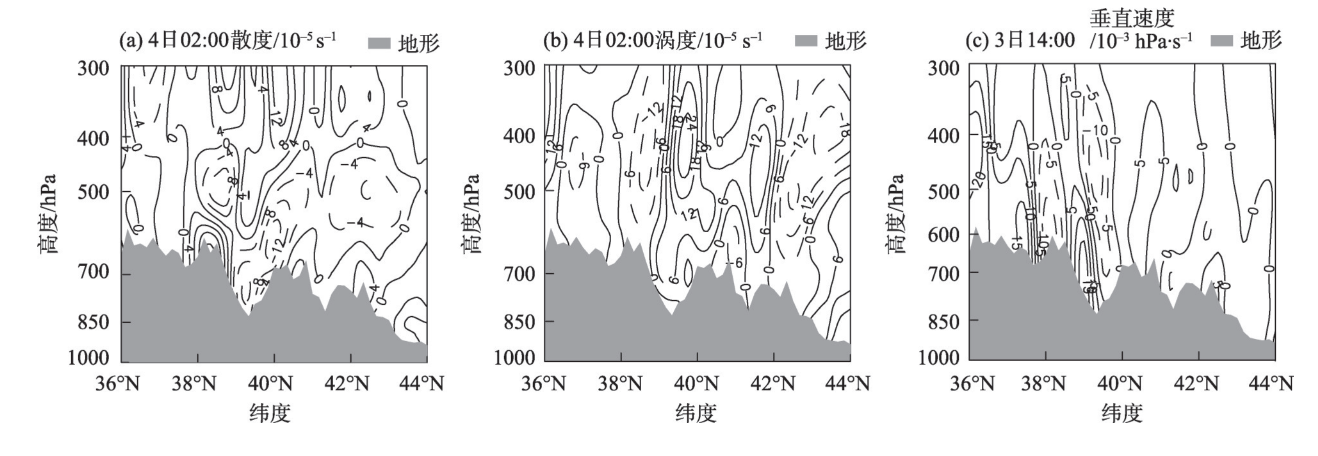


图7　沿75°15′E的纬度高度剖面图

Fig. 7　Latitude-altitude profile along 75°15′E

区上空有 10×10^{-5} s^{-1}的正涡度中心，随着系统的东移，4日02:00降雪区上空整层均为正涡度区，500 hPa上的强正涡度中心强度增大至 25×10^{-5} s^{-1}，降雪强度也随之增加，此时散度场与涡度场的有利配置使得整层垂直上升运动增强，并一直持续至6日。此次暴雪过程上升运动较强，无论是低层还是中高层，均存在垂直速度负值中心，这与以往喀什、克州地区发生强降雪时垂直速度大但中心位置较低，或中心位置高但垂直速度小[18]的情况存在差异。

2.5.2 不稳定机制分析 4日凌晨至白天为最强降雪时段，图8a为3日20:00喀什站温度压力对数（T–ln$P$）图，500 hPa为西南风，风速为15 m·s^{-1}，600 hPa以下为偏东风，在中层700~600 hPa，温度露点差（T–Td）≤2 ℃，为近饱和湿层，0~6 km风矢量差达22 m·s^{-1}，风切变为西南风，与热成风方向一致，具有较强斜压性。对比3日08:00的探空曲线，20:00能量指数明显增加，具有一定对流潜势，垂直风切变增强，整层大气的斜压性有所增强，为对流的发展提供了有利层结条件。在探空图上还表现出在900~800 hPa存在逆温层，结合前面的环流分析可以得出解释：500 hPa低值系统进入克州、喀什之后西部空气相对暖湿，喀什地区低层为偏西风，加之冷空气东灌的逐步加强，塔里木盆地自东向西的偏东风急流在降雪区辐合，其将西部相对暖湿的空气抬到一定的高度[1]，因此形成逆温。这样导致在降雪区的近地面层有一个相对冷的"冷垫"，若对流发生冷垫之上，则为高架对流，可见本次降雪具有高架对流特征。

由于冬季的抬升及热力条件较夏季弱，垂直对流较难产生，但倾斜发展的对流通常比垂直对流容易，在条件对称不稳定下，只要存在倾斜上升运动，大气达到饱和，很小的抬升就可以触发对流[20]。此次降雪过程是否属于这种机制呢？进一步分析本次过程的条件对称不稳定，其判据为热成风垂直方向上饱和相当位温的变化率大于绝对地转动量的变化率（喀什站探空表现为中层大气水汽接近饱和，因此可用假相当位温代替饱和相当位温，另外由于热成风方向为近似西风，可近似认为纬度方向为热成风方向），沿乌恰站经度75°15′E做地转绝对动量（Mg）和假相当位温（θse）的剖面（图8b），在强降雪区上空700~550 hPa，θse的斜率大于Mg，满足条件对称不稳定判据，此次极端降雪具有条件对称不稳定导致的倾斜对流特征。

3 结 论

利用多源资料，对2017年春季南疆西部的一次极端暴雪天气的环流背景特征、水汽条件及触发机制进行综合分析，得出以下结论：

（1）此次暴雪过程是在不同尺度的天气系统配合下产生的。500 hPa中亚低涡是此次暴雪天气的主要影响系统，低涡前部偏南气流不仅引导中亚南部暖湿气流北上，其前部的正涡度平流还为暴雪发生提供了有利的动力条件；冷空气"东灌"形成的低空偏东急流在南疆西部辐合，形成一个"楔"，把相对暖湿的空气抬到一定的高度，在近地面形成一个

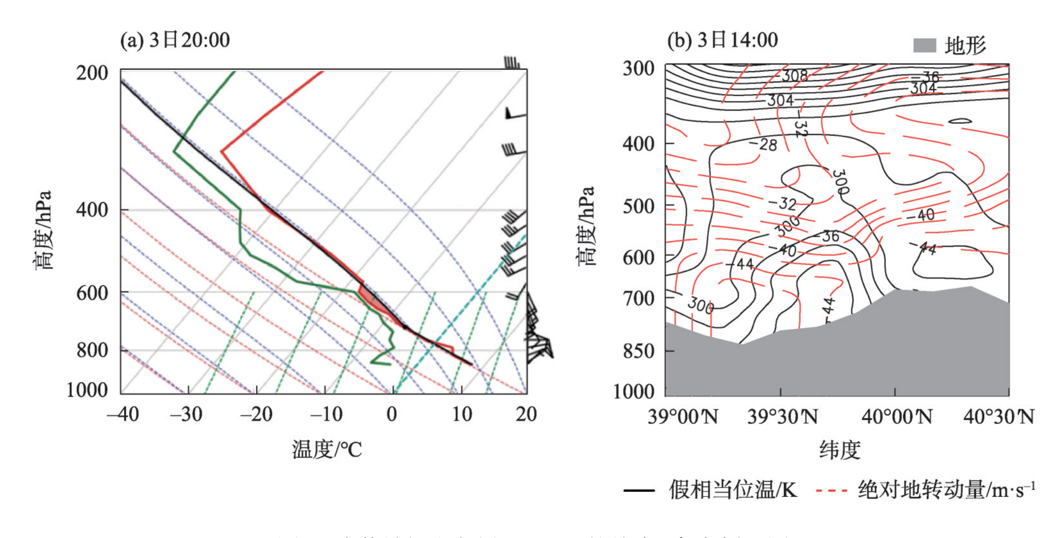


图8 喀什站探空与沿75°15′E的纬度–高度剖面图

Fig. 8 Radiosonde at Kashgar station and latitude-altitude profile along 75°15′E

"冷垫"。

(2) 暴雪过程中存在里咸海至南疆西部的偏西路径、中亚南部偏南路径和南疆盆地东部至西部的偏东路径3条水汽输送通道;对流层不同层次的水汽收支表现为:中高层随偏西偏南气流的西边界、南边界输入和中低层随盆地内偏东气流的东边界输入,其中东边界的水汽输送强度变化与降雪强度变化对应较好。

(3) 云图和雷达回波产品中都表现出对流性质,云带内TBB<-65 ℃、尺度介于80~200 km的中-β尺度对流云团的发展、移动和消亡与强降雪发生时间和落区有较好的对应关系,是造成降雪强度>2.0 mm·h^{-1}的主要原因;虽然雷达回波主要为层状云回波,但其中的块状回波最强反射率因子大于40 dBZ,回波顶高>5 km,与夏季弱对流降水回波相当。

(4) 本次暴雪过程具有冷季高架对流的部分特征,低层为相对冷的偏东气流,高层为相对暖湿的偏南气流,降雪区喀什站探空图上900~800 hPa存在逆温层,并且其上空700~550 hPa存在θse斜率大于Mg斜率的区域,满足条件对称不稳定判据,初步判断为条件对称不稳定导致的倾斜对流发展造成了强降雪的发生。

(5) 本次过程中无论是低层还是中高层均存在垂直速度大值中心,这种分布与以往研究不同,这可能与条件对称不稳定导致的倾斜对流发展有关。

参考文献(References)

[1] 张家宝, 邓子风. 新疆降水概论[M]. 北京: 气象出版社, 1987: 77-89. [Zhang Jiabao, Deng Zifeng. A generality of rainfall in Xinjiang[M]. Beijing: Meteorology Press, 1987: 77-89.]

[2] 胡顺起, 曹张驰, 陈滔. 山东省南部一次极端特大暴雪过程诊断分析[J]. 高原气象, 2017, 36(4): 984-992. [Hu Shunqi, Cao Zhangchi, Chen Tao. Diagnostic analysis of a historical extreme snow process in south of Shandong Province[J]. Plateau Meteorology, 2017, 36(4): 984-992.]

[3] 李刚, 刘畅, 曹玥瑶, 等. 一次1月山东半岛东部极端海效应暴雪的发生机制分析[J]. 气象, 2020, 46(8): 1074-1088. [Li Gang, Liu Chang, Cao Yueyao, et al. Case study on generation mechanism of extreme ocean-effect snowstorm in the east of Shandong Peninsula in January[J]. Meteorological Monthly, 2020, 46(8): 1074-1088.]

[4] 卢秉红, 杨青, 高松影, 等. 两次不同类型暴雪的雷达回波特征分析[J]. 干旱气象, 2016, 34(5): 836-840. [Lu Binghong, Yang Qing, Gao Songying, et al. Doppler radar echo features about two kinds of snowstorm weather process[J]. Journal of Arid Meteorology, 2016, 34(5): 836-840.]

[5] 胡亮帆, 胡文东, 谷思雨, 等. 宁夏一次春季突发寒潮极值暴雪过程的等熵位涡分析[J]. 干旱区地理, 2019, 42(2): 271-279. [Hu Liangfan, Hu Wendong, Gu Siyu, et al. Isentropic potential vorticity for a sudden cold wave and extreme snowstorm process in spring 2016 in Ningxia[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(2): 271-279.]

[6] 王宁, 秦玉琳, 姚帅, 等. 不同触发条件下吉林省一次极端暴雪大风天气过程诊断分析[J]. 气象与环境学报, 2017, 33(3): 1-9. [Wang Ning, Qin Yulin, Yao Shuai, et al. Diagnostic analysis of an extreme blizzard and gale weather process under different triggering conditions over Jilin Province[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2017, 33(3): 1-9.]

[7] 李津, 赵思雄, 孙建华. 一次华北破纪录暴雪成因的分析研究[J]. 气候与环境研究, 2017, 22(6): 683-698. [Li Jin, Zhao Sixiong, Sun Jianhua. Analysis of a record heavy snowfall event in north China[J]. Climatic and Environmental Research, 2017, 22(6): 683-698.]

[8] 刘红武, 李振, 唐林, 等. 2018年12月湖南极端低温暴雪环流特征及成因分析[J]. 暴雨灾害, 2020, 39(5): 487-495. [Liu Hongwu, Li Zhen, Tang Lin, et al. Circulation characteristics and causes of extreme low temperature and blizzard in Hunan in December 2018[J]. Torrential Rain and Disasters, 2020, 39(5): 487-495.]

[9] 孙俊, 邓国卫, 夏炳江. 川西高原中部一次极端暴雪成因分析[J]. 气象科技, 2018, 46(3): 584-593. [Sun Jun, Deng Guowei, Xia Bingjiang. Analysis of an extreme snowstorm weather process in centrol western Sinchuan Plateau[J]. Meteorological Science and Technology, 2018, 46(3): 584-593.]

[10] 张俊兰, 杨霞, 李建刚, 等. 2015年12月新疆极端暴雪天气过程分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2018, 12(5): 1-9. [Zhang Junlan, Yang Xia, Li Jiangang, et al. The analysis to the process of extreme blizzard in weather in December of 2015[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2018, 12(5): 1-9.]

[11] 张俊兰, 万瑜, 闵月. 乌鲁木齐"2015. 12. 11"极端暴雪天气的综合分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2017, 11(1): 1-10. [Zhang Junlan, Wan Yu, Min Yue. Comprehensive analysis of an extreme blizzard in Urumqi on December 11th, 2015[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2017, 11(1): 1-10.]

[12] 许婷婷, 张云惠, 于碧馨, 等. 2015年12月乌鲁木齐极端暴雪成因分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2017, 11(5): 23-29. [Xu Tingting, Zhang Yunhui, Yu Bixin, et al. Analysis of extreme blizzard in December 2015 in Urumqi[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2017, 11(5): 23-29.]

[13] 牟欢, 赵丽, 孙硕阳, 等. 天山北麓两次暴雪天气对比分析[J]. 干旱区地理, 2019, 42(6): 1262-1272. [Mou Huan, Zhao Li, Sun Shuoyang, et al. Comparative analysis of two blizzard weather mechanisms in the northern piedmonts of Tianshan Mountains[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(6): 1262-1272.]

[14] 王勇, 赵战成, 晏军, 等. 新疆雪灾的时空分布特征及等级划分[J]. 干旱区地理, 2020, 43(3): 577-583. [Wang Yong, Zhao Zhancheng, Yan Jun, et al. Spatial and temporal distribution characteristics and its classification of snow disaster in Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(3): 577-583.]

[15] 张云惠, 于碧馨, 谭艳梅, 等. 乌鲁木齐一次极端暴雪事件中尺度分析[J]. 气象科技, 2016, 44(3): 430-438. [Zhang Yunhui, Yu Bixin, Tan Yanmei, et al. Mesoscale analysis of an extreme blizzard in Urumqi[J]. Meteorological Science and Technology, 2016, 44(3): 430-438.]

[16] 田亚林, 李雪梅, 李珍, 等. 1980—2017年年天山山区不同降水形态的时空变化[J]. 干旱区地理, 2020, 43(2): 308-318. [Tian Yalin, Li Xuemei, Li Zhen, et al. Spatial and temporal variations of different precipitation types in the Tianshan Mountains from 1980 to 2017[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(2): 308-318.]

[17] 新疆气象局. 新疆短期天气预报指导手册[M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1986: 184-217. [Xinjiang Weather Bureau. Xinjiang weather forecast guidance manual[M]. Urumqi: Xinjiang People's Publishing House, 1986: 184-217.]

[18] 杨霞, 张云惠, 赵逸舟, 等. 南疆西部一次罕见大暴雪过程分析[J]. 高原气象, 2015, 34(5): 1414-1423. [Yang Xia, Zhang Yunhui, Zhao Yizhou, et al. Analysis on rare snowstorm in west of southern Xinjiang[J]. Plateau Meteorology, 2015, 34(5): 1414-1423.]

[19] 张云惠, 钱文新. 南疆西部一次暴雪天气诊断分析[J]. 新疆气象, 2005, 34(增刊 1): 21-23. [Zhang Yunhui, Qian Wenxin. The analysis of a snowstorm in west of south-Xinjiang[J]. Xinjiang Meteorology. 2005, 34(Suppl. 1): 21-23.]

[20] Colman B R. Thunderstroms above frontal surfaces in environments without positive CAPE[J]. Monthly Weather Review, 1990, 118(5): 1103-1121.

[21] 吴乃庚, 林良勋, 冯业荣, 等. 2012年初春华南"高架雷暴"天气过程成因分析[J]. 气象, 2013, 39(4): 410-417. [Wu Naigeng, Lin Liangxun, Feng Yerong, et al. Analysis on the causes of an elevated thunderstorm in early spring of south China[J]. Meteorological Monthly, 2013, 39(4): 410-417.]

[22] 张一平, 俞小鼎, 孙景兰, 等. 2012年早春河南一次高架雷暴天气成因分析[J]. 气象, 2014, 40(1): 48-58. [Zhang Yiping, Yu Xiaoding, Sun Jinglan, et al. Analysis on weather causes of an elevated thunderstorm in Henan in early spring 2012[J]. Meteorological Monthly, 2014, 40(1): 48-58.]

[23] 俞小鼎, 周小刚, 王秀明. 中国冷季高架对流个例初步分析[J]. 气象学报, 2016, 74(6): 902-918. [Yu Xiaoding, Zhou Xiaogang, Wang Xiuming. A preliminary case study of elevated convection in China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2016, 74(6): 902-918.]

[24] 俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南, 等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006: 47-53. [Yu Xiaoding, Yao Xiuping, Xiong Tingnan. Principle and business application of Doppler weather radar[M]. Beijing: Meteorology Press, 2006: 47-53.]

Comprehensively analysis of an extreme snowstorm in the west of southern Xinjiang in spring

SHI Junjie[1], SUN Mingjing[1], LYU Xinsheng[1], ZHANG Junlan[1], LI Huoqing[2]

(1. Xinjiang Meteorological Observatory, Urumqi 830002, Xinjiang, China; 2. Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, Xinjiang, China)

Abstract: Based on the high radiosonde observation data, National ground weather station observation data, National Center for Environmental Prediction (NCEP, 0.25°×0.25°) reanalysis data, FY2E satellite data, and products of Kashgar Doppler weather radar station, extreme snowstorm weather in the west of southern Xinjiang of China from March 3 to 6, 2017 was comprehensively analyzed. According to the findings, the 500 hPa low vortex cutoff in Central Asia is the primary influence system of the extreme snowstorm. In this snowstorm, three main branches of water vapor emerge from the west and south of the middle and high layers, as well as from the east of the middle and low layers. The long-term maintenance of east jet formed between 850−700 hPa is not only critical in water vapor transportation (the water vapor transports from the eastern part of Tarim Basin in southern Xinjiang to the west and converges in the west of southern Xinjiang forming a convergence center, increasing the efficiency of water vapor convergence), but it also lifts the relatively warm and humid air in the west of southern Xinjiang to a certain height and acts as a "cold pad". In this snowfall process, the development and maintenance of meso-β scale convective cloud clusters with black body temperature (TBB) <−65 °C and scales between 80−200 km in the cloud belt are the main reasons for the high snowfall intensity. Kashgar station's Doppler radar echo appears to be a mixed echo accompanied by stratiform and block cloud echo. The reflectivity factor of stratiform cloud echo is typically 15−25 dBZ, with a large horizontal scale, long time duration, and a small variation range, resulting in long-term stable snowfall. The strongest reflectivity factor of block echo is >40 dBZ, and the top height is >5 km, indicating convective echo characteristics, resulting in strong hourly snow over 2 $mm \cdot h^{-1}$. Further study shows that the extreme snowstorm process shows part of the characteristics of elevated convection in the cold season. The latitude-altitude profiles of geostrophic absolute momentum (Mg) and pseudo equivalent potential temperature (θse), together with the Wuqia station, the largest snowfall center, show that during the snowstorm process, the slope of θse is greater than that of Mg between 700−550 hPa, satisfying the conditional symmetric instability criterion. It is preliminarily judged that the extreme snowfall is caused by the inclined convection caused by the conditional symmetric instability.

Key words: snowstorm; low level jet; instability mechanism; oblique convection; the west of southern Xinjiang